TECHNISCHER ANHANG

T E C H N I S C H E R A N H A N G

In diesem Kapitel werden technische Einrichtungen, Modelle und Phantome beschrieben, welche für die Arbeit teilweise nach eigenen Angaben gesondert angefertigt, montiert oder speziell angeordnet wurden, teilweise in ihrer Funktion geprüft (PYCHLAU-Anlage) und modifiziert, oder wie das Mikroskop-Photometer zum Densitometer ergänzt wurden. Das E.I.L.-Dosimeter kam nach Eichung original zur Verwendung.
Die Anlage zur Frequenzanalyse stellten Herr Professor Dr.Dr. H. HAGER und Herr Dipl. Physiker Dr. S. BOSECK vom Lehrstuhl II des Pathologischen Institutes der Universität Gießen zur Ausmessung der röntgenphotographischen Aufnahmen zur Verfügung.

Inhaltsverzeichnis

		Seite
A.0	Messung von Spannung und Strom im Primärstromkreis	1
A.1	Messung von Spannung und Strom im Sekundärstromkreis	5
A.2	Messung im Sekundärstromkreis mit dem mAs-Meter	8
A.3	Ionisationsdoppelkammeranlage nach PYCHLAU	8
A.4	Messung und Schreibung der Dosisleistung im Primärstrahlenbündel wie in der Strahlenbildebene mittels Ionisationskammer und Zweistrahloszillograph	17
A.5	Bleischieber zur verzögerten Freigabe der Strahlung in Verbindung mit der Dosisoszillographie	17
A.6	Ionisationsmessungen	19
A.7	Photometrische bzw. densitometrische Messungen	21
A.8	Frequenzanalytische Messungen	23
B.0	Praeparation zur Herstellung des inhomogenen Hintergrundes inform der Gefäßzeichnung der Lungen	31
B.1	Herstellung von Kunststoffkugeln	36
B.2	Drahtgitteranordnungen	44
B.3	Anordnungen zur Untersuchung vor homogenem Untergrund und inhomogenem Hintergrund	45

Technischer Anhang

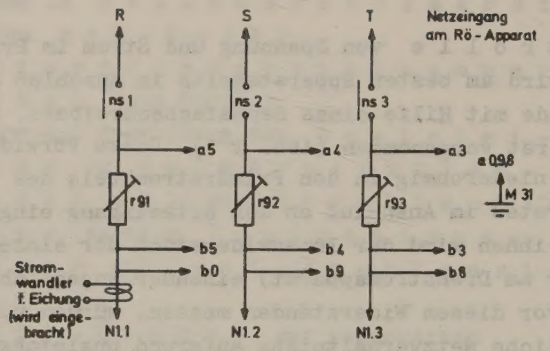
A.0 Messung von Spannung und Strom im Primärstromkreis

Die Kontrolle von Spannung und Strom im Primärstromkreis wird am besten apparateseits im Anschluß an Vorwiderstände mit Hilfe eines Sechsfachschreibers, z.B. einem EKG-Gerät vorgenommen (Abb. T*1). Diese Vorwiderstände sind niederohmig in den Primärstromkreis des Röntgenapparates im Anschluß an den Netzeingang eingebracht. Mit ihnen wird der Innenwiderstand der einzelnen Phasen (hier am Drehstromapparat) einander angeglichen. Wollte man vor diesen Widerständen messen, würden u.U. unterschiedliche Netzverhältnisse aufgrund ungleicher Innenwiderstände der einzelnen Phasen in die Messung mit eingehen.

Nach Eichung des EKG-Gerätes lassen sich die Spannungen und die Ströme der drei Netzphasen registrieren und mögliche Abweichungen des Innenwiderstandes jeder Phase von dem Sollwert einfach berechnen. Der Innenwiderstand kann sich verändern, wenn bauliche Veränderungen, d.h. Zuschaltungen im Netzkreis vorgenommen werden.

Die Schaltung zur Strommessung erfolgt über einen Trenntransformator und eine Spannungsteilerkombination. Die Eichung wird mittels eines Durchflußstromwandlers und eines Messinstrumentes vorgenommen. Sie beträgt als Normeichung 5 A/mm oder 50 A/cm in jeder Phase. Die Toleranz wird mit 10 % ($\pm$ 5 %) angegeben. Die Schaltung zur Spannungs-

*Die Nummern der Abbildungen im technischen Anhang erhalten ein "T" vorgesetzt, um sie gegen die Nummern der Abbildungen im Hauptteil unterscheiden zu können.



Skizze zur Lage, Schaltung und Eichung der Netzeingangswiderstände am Rö-Generator

Abb. T 1: Skizze zur Lage, Schaltung und Eichung der Netzeingangswiderstände am Röntgengenerator (R, S, T = Netzphasen, N 1.1... = Primärstromkreis

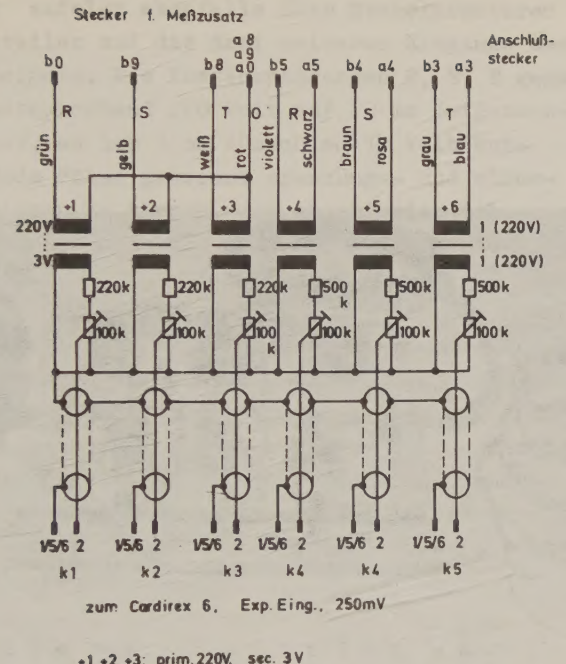


Abb. T 2: Schaltskizze von Anschlußstecker, Trenntransformator und Spannungsteiler-Kombination zur S p a n n u n g s - und S t r o m m e s s u n g mittels eines S e c h s f a c h s c h r e i b e r s (EKG-Gerät)

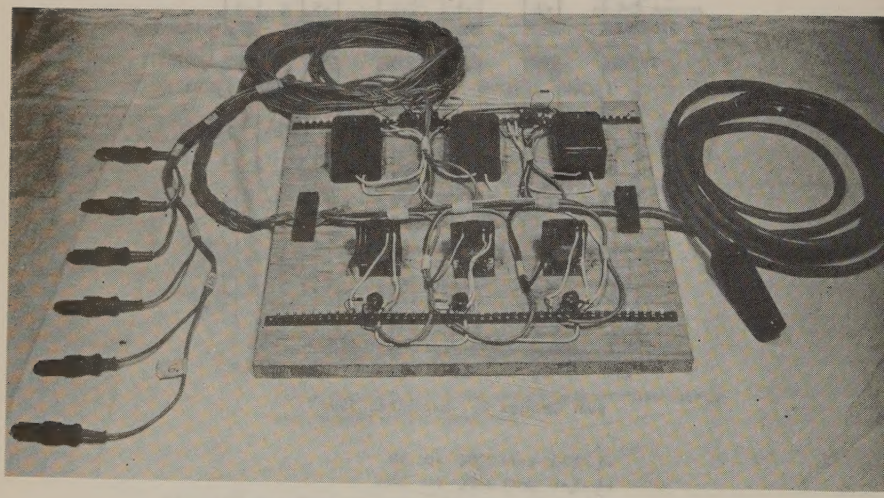


Abb. T 3: Ansicht der Spannungsteilerkombination mit Transformator und Anschlußsteckern, nach Abb. T 2

m e s s u n g erfolgt ebenfalls über Transformatoren und Spannungsteiler auf die drei weiteren Eingänge des Sechsfachschreibers. Die Phasenspannungen R, S, T gegen Null werden entsprechend 220 Volt auf 22 mm Zeigerausschlag gebracht, so daß 1 mm Ausschlag 10 Volt entspricht. Um jede Phase getrennt spannungs- und strommäßig registrieren zu können, ist es erforderlich, die Phasenspannung gegen den Null-Leiter zu messen (Abb. T2 u. T3).

Als M e ß w e r t e erhält man den Netzzusammenbruch während der Aufnahme und den Innenwiderstand jeder Phase. Der Netzzusammenbruch wird durch Subtraktion der Spannung während der Aufnahme von der Leerlaufspannung errechnet und kann direkt in Volt abgelesen werden. Den Innenwiderstand jeder Phase erhält man durch Division des Differenzwertes der Spannung durch den Stromwert, entsprechend dem OHM'schen Gesetz.

A.1 M e s s u n g v o n S p a n n u n g u n d S t r o m i m S e k u n d ä r s t r o m k r e i s

über Meßwiderstände (geeichte Spannungsteiler) wird die Hochspannung im Sekundärstromkreis auf Niederspannung heruntergeteilt, so daß ein der Hochspannung proportionales Signal zur Verfügung steht. Dieses kann mittels eines Oszillographen* registriert werden. Eine hierfür erforderliche Nullpunktsunterdrückung (genauere Meßergebnisse), phasenstarre Auslösung und damit gekoppelte Triggerung wird in einem speziellen Meßzusatz ** erreicht. Steht ein Zweistrahloszillograph, wie hier, zur Verfügung, kann gleichzeitig die Stromkurve geschrieben werden (Abb. T4 und T5). Dies erfordert neben der zuvor beschriebenen

---

* Tektronic Dual-Beam Oscilloscope Type 502 A

** Siemens-AG, Bereich Medizinische Technik

Meßanordnung für Hochspannungsmessung und Strommessung im Sekundärstromkreis des Hochspannungstransformators

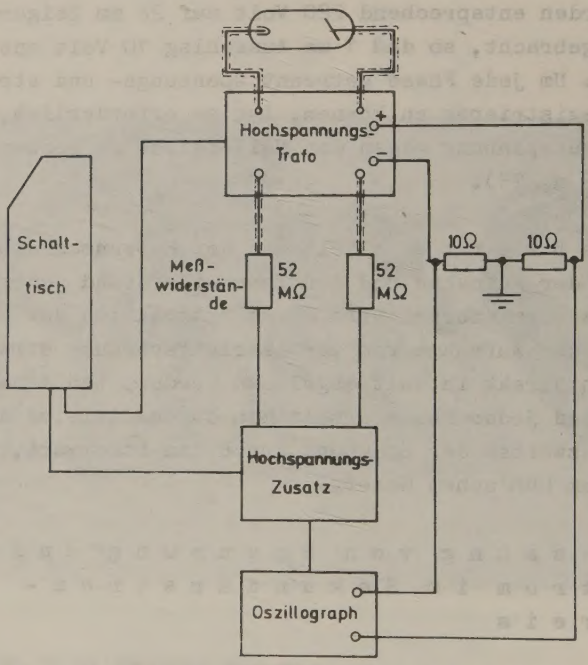


Abb. T 4: Meßanordnung zur Messung von Spannung und Strom im Sekundärstromkreis

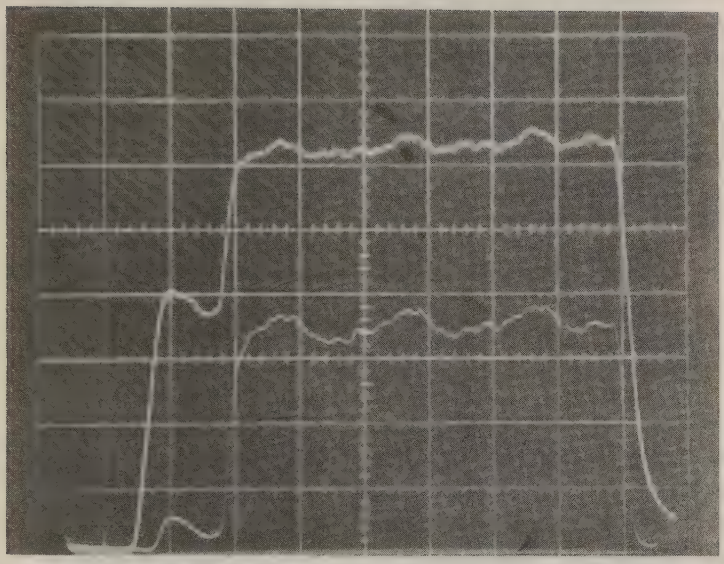


Abb. T 5: Beispiel von Meßkurven der Hochspannung (obere Kurve) und des Stroms (untere Kurve) im Sekundärstromkreis des Hochspannungstransformators.
(Ordinate: 10 kV/Skalenteil (grob) für die Hochspannungskurve
50 mA/Skalenteil (grob) für die Stromkurve
Abszisse: Zeitablenkung, 1 msec/Skalenteil (grob))

Schaltung eine Widerstandskombination von zwei 10 - OHM-Widerständen, welche in den positiven und negativen Meßausgang des Transformators gebracht und an den Oszillographen angeschlossen wird.

Als M e ß w e r t e werden Spannung und Strom im Sekundärstromkreis erhalten. Sie bilden das Ergebnis der elektrischen Vorgänge im Apparat und die Voraussetzung für die Entstehung der Strahlung.

A.2 M e s s u n g i m S e k u n d ä r s t r o m k r e i s m i t d e m m A s - M e t e r

Das im Haupttext als drittes Teilglied besprochene mAs-Meter ermöglicht bei genauer Kenntnis der Schaltzeit (s) die Feststellung des Stromwertes und erlaubt die Durchführung einer Kontrolle der Aufnahmebedingungen in Verbindung mit der im folgenden zu beschreibenden Ionisationsdoppelkammeranlage nach PYCHLAU. Es ist damit möglich, eine evtl. Abweichung der Aufnahmebedingungen von den ursprünglichen Werten zu erkennen, ohne daß allerdings über deren Ursache ein weiterer Hinweis gewonnen werden könnte.

A.3 I o n i s a t i o n s d o p p e l k a m m e r a n l a g e n a c h PYCHLAU

Mittels einer an der Objektseite der Tiefenblende (Abb. T6) angebrachten Ionisationsdoppelkammeranlage kann über eine Härtemessung mit Kupferfiltern im Primärstrahlenbündel die effektive Hochspannung als Mittelwert aller auftretenden Hochspannungswerte bestimmt werden (Abb. T11). Technisch wird dies über Integrationskondensatoren (Abb. T7, T9, T10), deren Aufladespannung proportional zur registrierten Dosis ist und welche über ein mechanisches Impulszählwerk abgefragt werden können, erreicht.

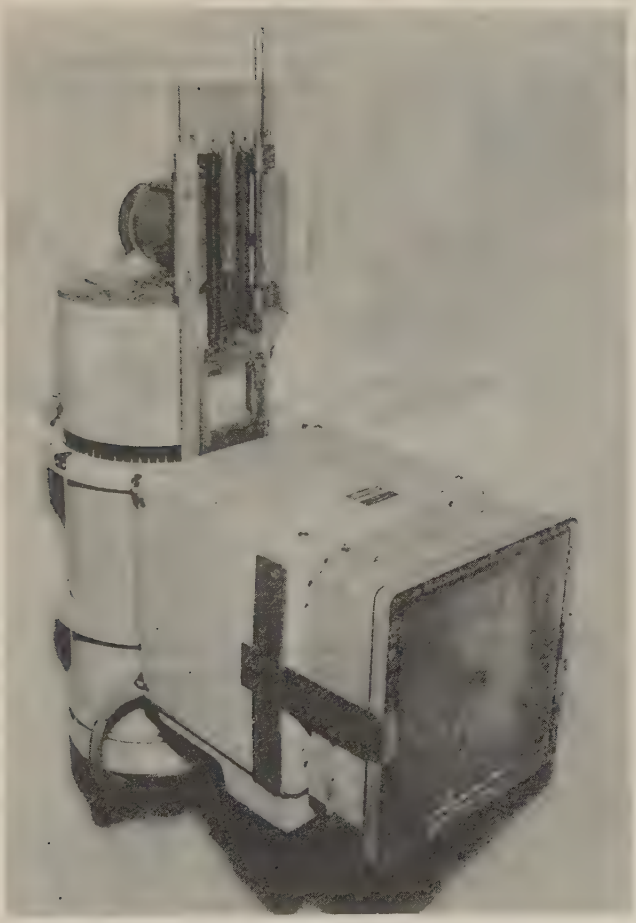


Abb. T 6: Röntgenröhre mit Tiefenblende, nach rechts unten gerichtet. Die Ionisationsdoppelkammeranlage wird mit der dritten Kammer durch ein Metallband gehalten. Die Elektrode der dritten Kammer ist als kleines Rechteck erkennbar.

Zwischen Röhrenhaube und Tiefenblendengehäuse ist der Bleischieber mit Gestänge und den Zugfedern sichtbar.

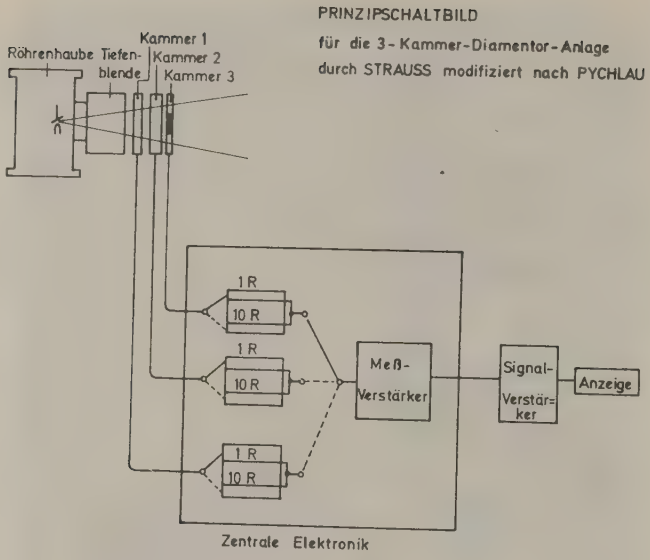


Abb. T 7: Prinzipschaltbild für die Ionisationsdoppelkammeranlage nach PYCHLAU mit dritter Kammer

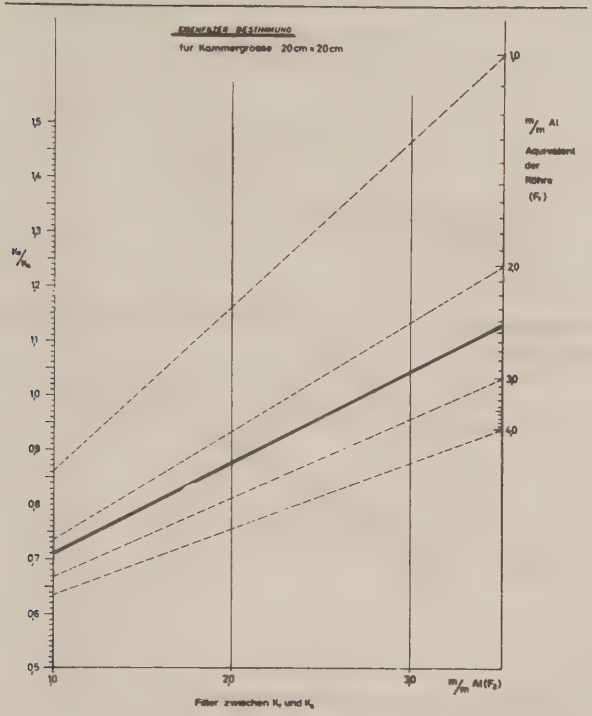


Abb. T 8: Beispiel der Bestimmung des Eigenfilters der Röhre (Öl und Glas) von 2,45 mm Al (ausgezogener Kurvenzug)

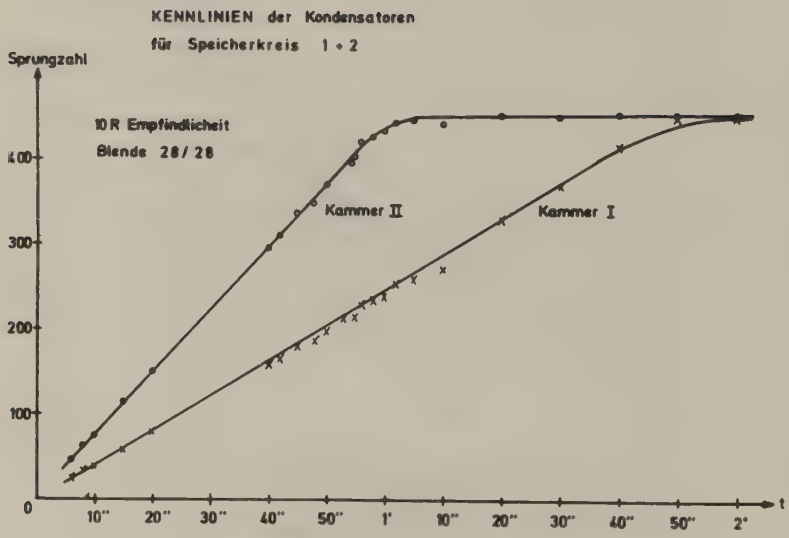


Abb. T 9: Diagramm zur Bestimmung des linearen Bereichs für die Anzeige der Sprünge an der Ionisationsdoppelkammeranlage bei der Empfindlichkeit $10 \frac{R\ cm^2}{Sprung}$.

Der optimale Bereich liegt zwischen 100 und 400 Sprüngen.

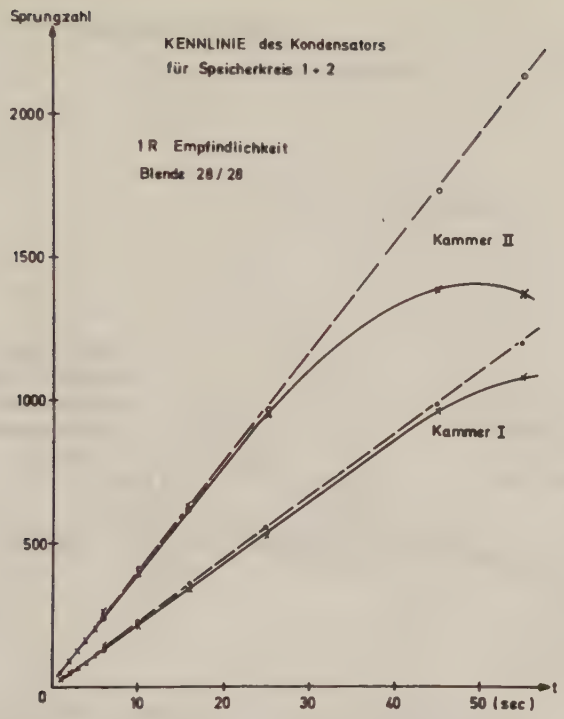


Abb. T 10: Diagramm zur Bestimmung des linearen Bereichs für die Anzeige der Sprünge an der Ionisationsdoppelkammeranlage für die Empfindlichkeit $1 \frac{R\ cm^2}{Sprung}$.

Der optimale Bereich liegt zwischen 100 und 800 Sprüngen.

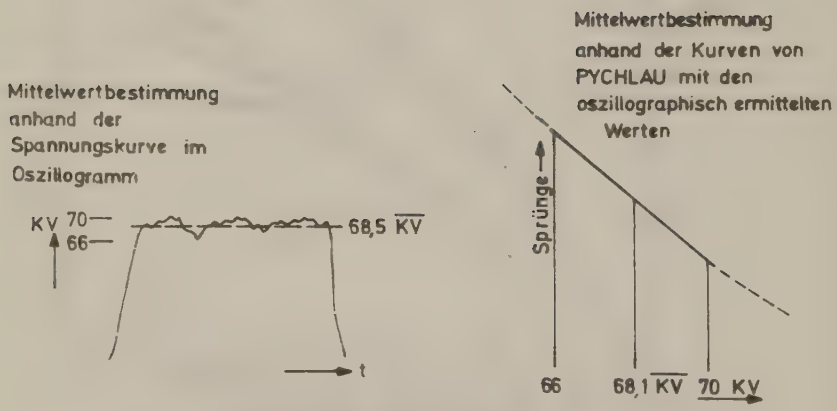


Abb. T 11: Kurvenbeispiele für die Bestimmung der "wahren kV" nach PYCHLAU. Vergleich der Hochspannungskurve (links) mit den im Zählwerk ermittelten Werten (rechts).

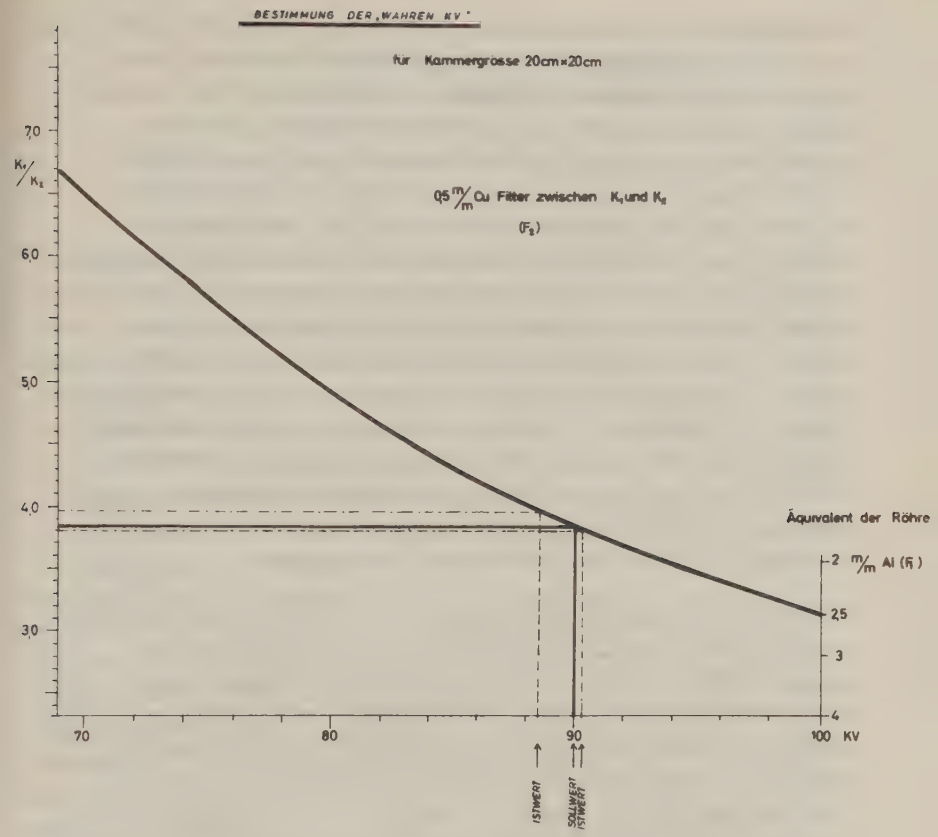


Abb. T 12: Vergleich von Istwerten (gestrichelt) und Sollwert (ausgezogen), bei der Bestimmung der "wahren kV" nach PYCHLAU (Erklärung im Text)

Die Genauigkeit der Anzeige liegt bei $\pm$ 5%, und ließe sich, allerdings mit nur sehr großem Aufwand wie etwa einer elektronischen Abfragung der gespeicherten Ladungsmengen und dem daraus gebildeten Verhältnis, noch erhöhen. Um auch bei kürzeren Schaltzeiten, etwa bis herab zu 80 msec messen zu können, wurde die Anlage modifiziert und die zentrale Elektronik für zwei Empfindlichkeiten, 1 R und 10 R pro Sprung des Zählwerkes ausgelegt. Mit einer gut sperrenden Diode konnte die Empfindlichkeit des Systems auf 0,4 R, bzw. 4,0 R verbessert werden. Zusätzlich läßt sich mit einer dritten Kammer mit zentralen Mittelelektroden von 2 cm Kantenlänge die Ausbeute in R/mAs, wiederum in Relativwerten, messen. Die Anzeige dieser Kammer unterliegt unvermeidlich Streustrahleneinflüssen, wie alle Kammern des Systems; wie überhaupt alle Messungen unter den in der klinischen Radiologie gegebenen Bedingungen.

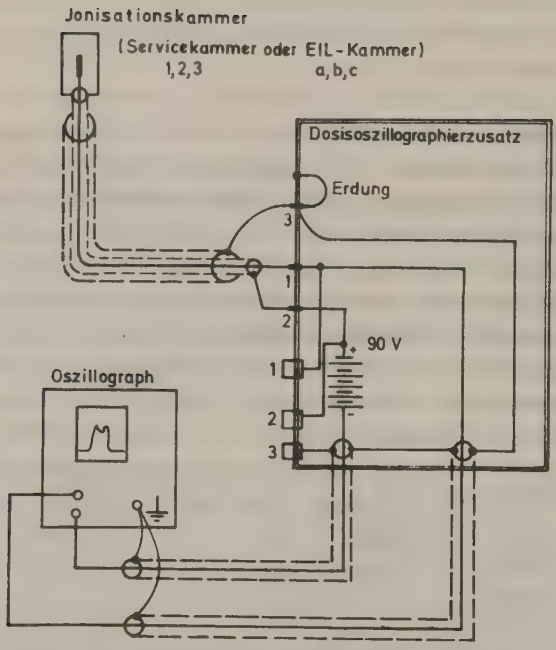
Beim Vergleich von Oszillogrammen der Hochspannungskurve mit Meßwerten, welche mit der Doppelkammeranlage gewonnen wurden, ergibt sich eine gute Übereinstimmung; der Mittelwert der gering unregelmäßig und gering gewellten Hochspannungskurve stimmt mit dem Mittelwert der von PYCHLAU angegebenen Kurve überein (Abb. T11). Die (gemessenen) Istwerte streuen um den Sollwert, wobei eine deutliche Tendenz nach der Seite der geringeren Spannung besteht. Dies rührt daher, daß PYCHLAU die Kurven bei kontinuierlicher Gleichspannung bestimmt, während die Messungen hier bei pulsierender Gleichspannung durchgeführt wurden (Abb. T12). Die Toleranz ist mit 10 - 15 % anzugeben.

A.4 Messung und Schreibung der Dosisleistung im Primärstrahlenbündel wie in der Strahlenbildebene mittels Ionisationskammer und Oszillograph

Heutigen Tages erfolgt die übliche Ionisationsmessung über ein Elektrometer. Die gemessenen Werte sind an einer Skala ablesbar, Kurven während eines Schaltvorgangs lassen sich damit nicht registrieren. Bei Verwendung einer Ionisationskammer zusammen mit einem Oszillographen läßt sich letzteres realisieren (Abb. T13). Hierzu wird eine Ionisationskammer (Kammer des Strahlenschutzdosimeters der Firma E.I.L., Richmond, England; Spezialkammer der Firma PTW/Dr. PYCHLAU, Freiburg; Jontomat-Service-Kammer der Firma Siemens-AG) über eine hochisolierte Leitung auf den Gleichspannungseingang, möglichst Differenzeingang eines Oszillographen gegeben. Eine Gleichspannungsquelle von 90 Volt, welche in ein abgeschirmtes Blechgehäuse eingebaut ist, dient als Spannungsquelle für die Kammer. Der Ionisationsstrom erzeugt an dem Eingangswiderstand von 1 Mega-OHM, welchen durchschnittliche Oszillographen von heute aufweisen, einen Spannungsabfall, welcher verstärkt und auf dem Oszillographenschirm dargestellt wird. Als Meßwert wird eine der Dosisleistung proportionale Kurve erreicht. Eine Eichung dieser Kombination ist bis jetzt nicht durchgeführt worden.

A.5 Bleischieber zur verzögerten Freigabe der Strahlung in Verbindung mit der Dosisoszillographie

Zwischen Röhrenaustrittsfenster und Tiefenblende wurde ein Bleischieber angebracht, welcher solange vor dem Aus-



Schaltbild zur Messung und Schreibung der Dosisleistung mittels Jonisationskammer und Oszillograph

Abb. T 13: Prinzipschaltbild für die Dosisoszillographie (die im Text erwähnte Spezialkammer der Fa. PTW ist hier nicht mit aufgeführt).

trittsfenster durch einen Riegel (Abb. T 6 und T 14) gehalten wird, bis die nach der Beschreibung im Haupttext an der Anstiegsflanke der Hochspannungskurve vorhandene Stufe und der Einschwingvorgang von ca. 250 msec durchlaufen sind. Das Lösen des Riegels erfolgt durch einen schnell und kräftig anziehenden Elektromagneten über einen verstellbaren elektronischen Verzögerungszusatz. Der Riegel wird durch den Zug von zwei Federn nach oben bewegt. Die Durchlaufzeit des Bleischiebers von 0 bis 80 % der Höhe der Dosisleistungskurve liegt bei ca. 4 msec. Diese Zeit konnte durch verstärkten Federzug und einen rasch und verstärkt anziehenden Elektromagneten von 6 msec auf die vorgenannten 4 msec verbessert werden. Zusätzlich gelang es, eine zunächst inkonstante Verzögerungszeit wegen unzureichender mechanischer Entriegelung derart zu verbessern, daß die Verzögerungszeit einstellbar und reproduzierbar war.

Als M e ß w e r t wird ein Dosisleistungsimpuls (ungeeicht) unter Anpassung an die auf das endgültige Niveau eingelaufene Hochspannungskurve erhalten. Dieser rührt von einem Primärstrahlenbündel i s o h e t e r o g e n e r Zusammensetzung her. Die Erläuterung dieses Begriffes erfolgt im Haupttext. Sicher wäre es auch hier möglich, einen solchen Impuls etwa auf elektrischem, bzw. elektronischem Wege mittels eines entsprechenden, allerdings wieder sehr hohen und auch finanziell hohen Aufwandes, zu erreichen.

A.6 I o n i s a t i o n s m e s s u n g e n

Die Ionisationsmessungen erfolgten mit einem Dosimeter der Firma E.I.L., entwickelt von OSBORN, CLIFTON und BURROWS mit einem speziellen empfindlichen Elektrometer (193,194). Das Modell 37 a ist für Strahlungen von 35 bis 120 kV ausgelegt. Die Wellenlängenabhängigkeit der Kammer wurde

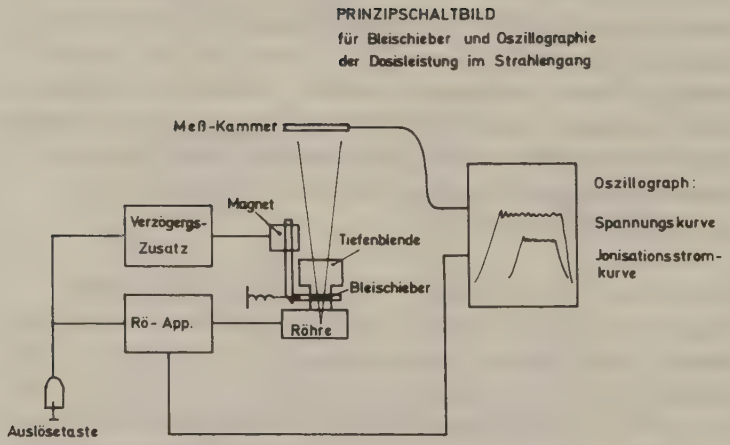


Abb. T 14: Prinzipschaltbild zu dem in Abb. T 6 sichtbaren Bleischieber nach KRIEG, RÖDEL und STRAUSS. Die Meßkammer für die Dosis-oszillographie ist mit eingezeichnet (siehe Abb. T 13)

an der physikalisch-technischen Bundesanstalt in Braunschweig bestimmt. Kammer und Instrument wurden zusammen geeicht.

Bei den Messungen in der Strahlenbildebene kam eine Kleinkammer zu diesem Gerät in Verwendung, deren Meßgang mit der geeichten Kammer verglichen wurde. Sie liegt in der Anzeige um den Faktor 9 (ohne Streustrahleneinfluß um den Faktor 10) niedriger, entsprechend der reduzierten Größe und damit der reduzierten Empfindlichkeit. Diese Kammergröße mußte gewählt werden, um in der Strahlenbildebene repräsentative Bezirke am Modell ausmessen zu können (98). Die Empfindlichkeit reichte gerade noch aus, um an der Elektrometeranzeige eine exakte Ablesung vornehmen zu können.

Die Dosisleistungsanzeige des Instrumentes wurde mit einem geeichten Zählrohr der Firma BERTHOLD (104, 105), ebenfalls bei der physikalisch-technischen Bundesanstalt in Braunschweig geeicht, verglichen. Die Werte gaben eine befriedigende Übereinstimmung.

Ebenfalls verglichen mit den beiden geeichten Instrumenten wurde die Anzeige der PYCHLAU-Doppelkammeranlage. Hiermit konnte bestätigt werden, daß die Anzeige 1 R und 10 R x cm^2 /Sprung, bzw. an unserer modifizierten Anlage 0,4 R und 4,0 R x cm^2 /Sprung betrug.

A.7 Photometrische bzw. densitometrische Messungen

Für makrodensitometrische Messungen stand der Universal-Dichtemesser DNF/8 der Firma van BRIESSEN KG, München, zur Verfügung. Der Meßbereich erstreckt sich von 0,0 bis 4,0 des negativen Logarithmus der Transparenz. Das runde Meßfeld weist einen Durchmesser von 2,0 mm auf.

Als M e ß w e r t e wurden Schwärzungswerte erhalten, welche am Punkt der höchsten und geringsten Absorption im Bereich des Meßfeldes, bzw. der Dominante ermittelt wurden und zur Bestimmung der mittleren Schwärzung in der Dominanten führten.

Für die M i k r o d e n s i t o m e t r i e wurde ein Mikroskopphotometer der Firma LEITZ/Wetzlar mit variabler Meßblende am Mikroskop ORTHOLUX verwendet. Um das Mikroskopphotometer als Densitometer verwenden zu können, war eine Messeinrichtung erforderlich, womit die ermittelten Werte logarithmiert werden konnten. Deshalb wurde an den Ausgang des Photomultipliers statt eines Galvanometers ein lin./log. - Schreiber der Firma VITATRON adaptiert. Hierzu waren folgende Zusatzschaltungen erforderlich:

1. Phasendrehung um 180° des gegen Null negativen Ausgangssignales des Photovervielfachers.
2. Verstärkung des Photovervielfacher-Ausgangssignales bei maximaler Empfindlichkeit - Stellung des Stufenschalters um den Faktor 32.
3. Unterdrückung des vom Photovervielfacher kommenden Rauschpegels auf ein vertretbares Mindestmaß (die Zeitkonstante des Verstärkers wird dadurch beeinflußt).
4. Impedanzwandlung vom Photovervielfacher - Arbeitswiderstand zum erforderlichen Schreiber - Quellwiderstand. Der Quellwiderstand des Schreibers soll möglichst niedrig sein (< 10 k-OHM), damit die daraus resultierende Schreibergeschwindigkeit nicht herabgesetzt wird.
5. Möglichkeit einer stufenlosen Gleichspannungs - Offset-Unterdrückung des am Eingang der Anpassungsstufe liegenden Photovervielfacher-Signales.

Dies wurde dadurch gelöst, daß parallel zum Eingang des Verstärkers I ein Kondensator für die nötige Rauschunterdrückung des Vielfachersignales sorgt. Gleichzeitig wird im ersten Verstärker die notwendige Verstärkung und die Offset-Unterdrückung des Eingangssignales besorgt. Der Verstärker II dient lediglich zur Phasendrehung und Impedanzwandlung. Beide Verstärker sind um der geringen Temperatur-Drift willen als Rechenverstärker mit Differenzstufen ausgebildet. In den Gegenkopplungszweigen befinden sich Kondensatoren, welche den Frequenzgang der Verstärker nach oben hin einengen. Am Ausgang des zweiten Verstärkers befindet sich ein Spannungsteiler, welcher durch einen entsprechenden Stufenschalter so angewählt werden kann, daß die Spannung während einer Messung nicht die Eingangsempfindlichkeit von 10 mV des Schreibers übersteigt.

Als M e ß w e r t e wurden Kurven erhalten, welche innerhalb des Bereiches von 10 mV zur Aufzeichnung gelangten. Sie wurden in Form der Schwärzung (=negativer Logarithmus der Transparenz) aufgezeichnet.

Zur gleichmäßigen Aufzeichnung wurde ein motorischer Objekttischvortrieb mit einem Getriebe für die Geschwindigkeit 200 μ/sec. verwendet. Das Getriebe ist auswechselbar gegen ein Getriebe für die Geschwindigkeit 50 μ/sec. und 3 μ/sec.

Für die Auswertung wurde der CALLIER-Quotient ermittelt und berücksichtigt. Dies war notwendig, da im Mikroskopphotometer ein wenn auch nicht streng gerichtetes, so doch mehr oder weniger gerichtetes Licht zur Verwendung kommt (22,144).

A.8 F r e q u e n z a n a l y t i s c h e M e s s u n g e n

(3,37,44,45,99,103,116,143,153,218,219,220,225,261,265,282)

Die Zahl der Schwingungen einer Welle in der Zeiteinheit wird als Frequenz bezeichnet. Solche Schwingungen ergeben

sich auch in einem Meßgerät, wenn zum Beispiel ein in der Intensität schwankender Lichtstrom abgetastet wird. So führt die Abtastung einer periodischen Hell- Dunkelverteilung im photographischen Film mit einem Photometer zu periodischen Schwingungen. Diese kommen dadurch zustande, daß das abtastende Meßorgan, z.B. eine Photozelle oder ein Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) zunächst eine Hellstelle voll erfaßt, anschließend zu deren Begrenzung gefahren wird, dabei die benachbarte Dunkelstelle im Anfangsteil erfaßt, bei weiterer Verschiebung die Hellstelle entläßt und wiederum die Dunkelstelle voll erfaßt. Dieser Übergang von der Hell- zur Dunkelstelle kann bei kontinuierlichem Abfahren nie zu einer sprunghaften, sondern immer nur zu einer kontinuierlich fortgesetzten Intensitätsänderung im Meßorgan und damit gegebenenfalls zu einer sinusförmigen Schwingung führen.

Die Schwingungen werden zeitlich hintereinander im Meßorgan registriert. An sich ist es gleichgültig, ob Helligkeitsschwankungen z e i t l i c h h i n t e r e i n a n d e r (Zeitfrequenz) eintreffen, oder über einer Fläche s t e h e n d a n g e o r d n e t sind und nacheinander abgetastet werden (Ortsfrequenz), also sich die Helligkeit mit dem Ort z.B. sinusförmig ändert (GREIS, 116). Am Beispiel des belichteten und entwickelten photographischen Films hat man sich unter Ortsfrequenz eine Hell- Dunkelverteilung vorzustellen. Um meßbare Voraussetzungen zu haben, werden solche Hell- Dunkelverteilungen periodisch und sinusartig moduliert angeordnet, und man spricht von Sinusgittern. Die Frequenz wird in Perioden/mm angegeben, d.h. eine hohe Frequenz (Schwingungszahl) bedeutet eine hohe Zahl von Perioden/mm, eine geringe Frequenz (Schwingungszahl) bedeutet eine niedrige Zahl von Perioden/mm.

Denkt man sich zwei solcher Sinusgitter um 90° gegeneinander gedreht und überlagert, so erhält man ein Kreuzgitter. Vielfache und in allen Richtungen orientierte Sinusgitter lassen sich als Punktgitter, besser Punkt-

raster beschreiben. Die einzelnen Emulsionskörner im Film bilden solche Punktraster.

Ein Kollektiv verschiedener Frequenzen wird als S p e k t r u m bezeichnet. Ist eine Schwingung (periodische Funktion) nicht harmonisch, so kann eine Berechnung zunächst nicht erfolgen. Nach FOURIER läßt sich jede periodische Funktion in Sinusschwingungen verschiedener Frequenzen zerlegen und damit berechnen. Da es sich um ein Kollektiv von Frequenzen handelt, wird von FOURIER - S p e k t r u m gesprochen.

Die Zerlegung einer Funktion in Sinusschwingungen kann zur Zeit auf drei Wegen durchgeführt werden:

a) auf mathematischem Wege,
b) auf lichtoptischem Wege,
c) auf elektronischem Wege.

Letzterer soll hier nicht weiter besprochen werden.

Auf m a t h e m a t i s c h e m Wege wird die durch das Messorgan gewonnene Kurve bei der Abtastung einer Hell- Dunkelverteilung mathematisch in das FOURIER-Spektrum zerlegt und das Ergebnis in Form der Intensität gegen die Frequenz aufgetragen.

Auf l i c h t o p t i s c h e m Wege wird das Licht einer Quelle am Punktraster (=vielfach übereinander gelagerte Sinusgitter) der Filmemulsion nach FRAUNHOFER gebeugt. Das abgebeugte Licht vermittelt sozusagen die Kenntnis der verschiedenen Schwingungszahlen (Ortsfrequenzen) des Objektes über das Beugungsbild. Je höher die Ortsfrequenz, desto weiter wird das Licht von der optischen Achse abgebeugt. Die einzelnen Ortsfrequenzen entsprechen Sinusschwingungen. Dies sind dieselben Sinusschwingungen, in welche sich eine Funktion nach FOURIER mathematisch "zerlegen" läßt.

P h y s i k a l i s c h - e x p e r i m e n t e l l läßt sich dies bewerkstelligen, indem als Lichtquelle einfarbiges (monochromatisches) Licht gleicher Schwingungsphase (kohärentes Licht) und in der gleichen Ebene schwingend verwendet wird. Infolge der spezifischen Wellennatur des Lichtes (Kohärenz) werden die gebeugten Wellenzüge als Intensitätsminima und -maxima sichtbar und damit meßbar. Dieses Nebeneinander von Minima und Maxima wird als Beugungsmuster bezeichnet. Die Messung der Minima und Maxima geschieht über eine Intensitätsmessung, wobei die Intensität durch das Quadrat der abgebeugten Amplituden der einzelnen abgebeugten Wellen dargestellt wird und durch das hinzugestreute Licht eine meßbare Beeinflussung erfährt.

BOSECK (33) entwickelte eine Beugeapparatur, bei welcher ein Laser-Strahl als monochromatisches und kohärentes Licht und das vorliegende Röntgenbild als "lichtbeugende Öffnung" verwendet wird. Das beugende Objekt wird in der Aperturblendenebene des Objektives angebracht, während in der Bildebene des Objektives das Beugungsgitter meßbar angeordnet ist.

Als M e ß w e r t e werden die Intensitätsminima und -maxima erhalten, welche sich entsprechend ihrem Ortsfrequenzspektrum in einer bestimmten Entfernung von der optischen Achse weg gebeugt vorfinden; der Beugungswinkel ist eine Funktion der Ortsfrequenz. Die Größe der Gitteröffnung steht im umgekehrten Verhältnis zum Abstand des zugehörigen gebeugten Lichtpunktes von der optischen Achse. Die Größe der Gitteröffnung wird in Linien /mm (Lp/mm) angegeben, da die Ortsfrequenz des Gitters durch die Breite der Gitterbalken und ihre Abstände bedingt ist. Üblicherweise werden nicht die Linien bzw. Balken, sondern die Linienpaare oder Balkenpaare, d.h. Balken und Abstand zusammen, pro mm angegeben.

Die E r g e b n i s s e werden in Kurven festgehalten, in welchen das Quadrat der Amplitude der Sinuswellen des kohärenten Lichtes, also die Intensität, gegen die Frequenzen in Linienpaaren /mm aufgetragen sind. Man bezeichnet diese Kurven auch als Strukturspektren. Sind die einzelnen Meßwerte des Spektrums gegen den Maximalwert in der optischen Achse zu 1 normiert, spricht man von der relativen spektralen Energiedichte, mit welcher einzelne Details - je nach ihrer Ortsfrequenz und Anordnung "sortiert" - im Bild vorhanden sind (BOSECK, 34), RÖHLER, 223).

In den Abbildungen T 15, T 16 und T 17 ist der optische Strahlengang aufgezeichnet (BOSECK, 33), in Abb. T 16 wird das Beugungsbild in der Form vorgelegt, wie es mit dem Photomultiplier ausgemessen wird. Die Abb. T 17 zeigt Kurvenscharen, welche durch Rechnung ermittelt wurden. Den Ausgangswert stellt dabei die vom nur fixierten Film gewonnene Kurve dar. Dabei wurde von der Annahme ausgegangen, daß diese Kurve im wesentlichen der Streulichtfunktion von Unterlage und Emulsion des Filmes entspricht. Diese Kurven waren notwendig, um bei der Auswertung der Ergebnisse auch quantitative Angaben machen zu können. Hierzu mußte der Einfluß des Streulichtes, wenn auch nur in Schätzung, berücksichtigt werden.

Die Besprechung der Ergebnisse erfolgt im fortlaufenden Text.

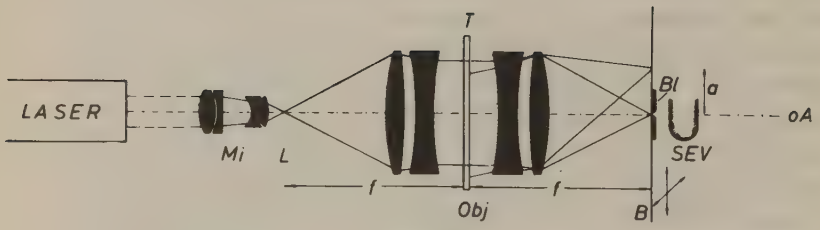


Abb. 2

Abb. T 15 : Skizze des Strahlengangs im optischen System der BOSECK'schen Beugeapparatur.

oA = Optische Achse

a = Entfernung der abgebeugten Intensität von der optischen Achse

SEV= Sekundärelektronenvervielfacher (Photomultiplier) = Meßorgan

T = Testobjekt

B = Beugungsebene mit Pfeilen, welche die Abtastrichtung des SEV bezeichnen

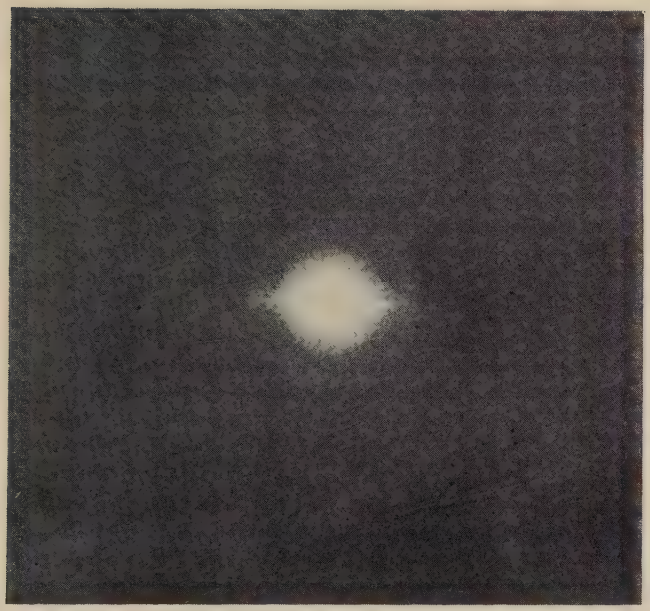


Abb. T 16: Vergrößerte photographische Aufnahme der Beugungsfigur, wie sie mittels des SEV ausgemessen wird. Meßrichtung senkrecht vom hellsten Bildpunkt (opt. Achse) nach oben. Maßstab: 1 : 4

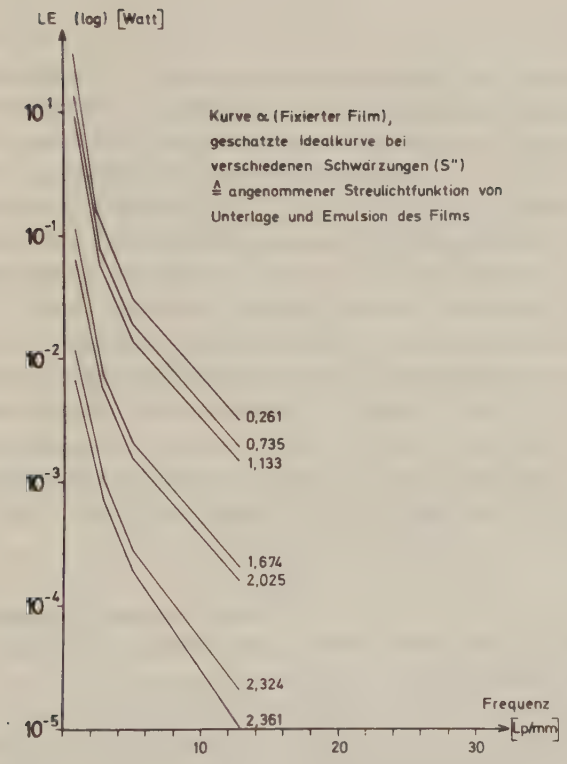


Abb. T 17: Kurvenscharen für die Streulichtfunktion bei verschiedenen Schwärzungen, ohne Berücksichtigung des CALLIER-Quotienten $\frac{S\,||}{S\perp}$

(Erklärung im Text)

B.0 Präparation zur Herstellung des inhomogenen Hintergrundes in Form der Gefäßzeichnung der Lungen

Zur Darstellung der Lungengefäßstrukturen als Hauptbestandteil der den inhomogenen Hintergrund auf Thoraxaufnahmen darstellenden Zeichnung bot sich das Verfahren zur Herstellung von anatomischen Korrosionspräparaten nach SCHUMMER (89,90) an. Hiernach wird ein flüssiges Polymerisat (Plastoid/Firma RÖHM und HAAS, Darmstadt) in die Blutgefäße einzelner Organe injiziert. Das Präparat wird in Formalin getränkt und bei 50° Trockenschranktemperatur gehalten. Hierunter tritt eine Polymerisation des Plastoid ein und das Präparat kann mit Kalilauge korrodiert werden, so daß nur das Polymerisat bestehen bleibt. Bei der Lungengefäßdarstellung bestand zunächst ein Nachteil darin, daß das feuchte Präparat kollabiert und die räumliche Anordnung der Gefäße verloren geht, auch nicht wiederherstellbar ist.

Zur Präparation waren frische Organteile, bzw. Lungen, erforderlich. Da die anatomische Anordnung der Blutgefäße mit zentralem Eintritt der Arterien in das Läppchen und peripherem Abgang der Venen am Läppchenrand beim Schaf der Anordnung in der menschlichen Lunge am nächsten kommt (siehe Haupttext, Abschnitt 2.24), wurden frische Lungen vom Schaf verwendet.

Die Entnahme der Lungen aus dem Thorax des frisch geschlachteten Tieres erfolgte zum Teil gegen die "Regeln des Schlachtvorgangs". Auf folgendes war zu achten:

a) Beim Töten mit dem Schußapparat kommt es zu einer Blutung im Gesichtsschädelbereich mit der Möglichkeit der Aspiration von Blut in die Lungen. Ebenso kann dies durch Aspiration von Blut aus

den eröffneten Halsschlagadern erfolgen. Durch Herauspräparieren des Larynx und Unterbindung der Trachea kann die Aspiration von Blut verhindert werden.

b) Bei der Technik der Extraktion des am oberen Schlund durchtrennten Oesophagus in den Bauchraum werden bindegewebige Verbindungen zwischen Oesophagus und Pleura mediastinalis zerrissen und damit die Pleura verletzt. Eine der wichtigsten Voraussetzungen zur Injektion von Plastoid in die Lungen ist damit nicht mehr erfüllt: Die Unversehrtheit der Pleura, wo auch immer. Zudem werden kleinere venöse Blutgefäße zerrissen, aus welchen bei der Injektion das Plastoid in störender Weise abfließen kann. Der Oesophagus muß deshalb am oberen Schlund und in Zwerchfellhöhe durchtrennt und belassen werden.

c) Die Entnahme der Lungen mit Oesophagus und Trachea (übereifrige Schlachter trennen die Trachea in Bifurkationshöhe ab und das Präparat wird damit unbrauchbar) erfolgt am besten vom Zwerchfell her, so daß das ganze Präparat unverletzt zutage gefördert werden kann.

Bei der weiteren Präparation wird wie folgt verfahren:

1) Die Injektion von Plastoid wird durch Kanülen vorgenommen, welche durch Korken geführt werden. Die Korken werden in den oberen Teil der Trachea, den Stamm der Arteria pulmonalis und in den linken Vorhof eingebracht, so daß die Füllung der Arterien und Venen vorgenommen, und gleichzeitig die Lungen mittels einer durchgehend betriebenen Luftpumpe in mittlerem Dehnungszustand gehalten werden können.

2) Zur Injektion wird farbloses Plastoid, ohne die üblichen Farbzusätze verwendet. Farbzusätze können höheratomige Substanzen enthalten (z.B. Titandioxyd) und die Absorptionsverhältnisse verfälschen.

Nach Polymerisation des Plastoid beträgt dessen Dichte 1,18 in welcher Konzentration auch immer injiziert wurde.

3) Um die räumlichen Verhältnisse zu erhalten, werden die Lungen mittels einer Luftpumpe, die über mehrere Tage und Nächte kontinuierlich betrieben werden muß, in mittlerem bis maximalem Dehnungszustand gehalten. Dies von Beginn der Injektion bis zur Festigung des im Trockenschrank fixierten Präparates, zumindest solange, bis die Außenfläche trocken ist und die Form der gedehnten Lunge erhalten bleibt. Letzteres ist nach ca. 36 Stunden im Trockenschrank bei 50 bis 55° Celsius der Fall.

4) Die Injektion erfolgt periodisch. Jeweils nach ca. 5 bis 6 Stunden wird nachinjiziert, wobei bis dahin 30 ccm in jede Lunge gegeben werden. Es ist darauf zu achten, daß die Kanülen bei Beendigung der Injektion frei von Plastoid gehalten werden. Bei Erwärmung polymerisiert dieses und würde die Kanülen nachhaltig verlegen. Die Gesamtmenge des injizierten Plastoid liegt bei ca. 70 bis 80 ccm je Lunge, sie kann bis 120 ccm je Lunge betragen.

5) Nachinjektionen können noch nach Tagen erforderlich sein, da bei der Polymerisation eine gewisse Schrumpfung bzw. Umverteilung des Plastoid eintritt und dieses sich schichtweise den Gefäß- bzw. Bronchuswänden anlegt. Die dadurch entstandenen Hohlräume bedürfen der Nachfüllung.

6) Erforderlichenfalls läßt sich das Präparat, dessen Größe das im Thoraxmodell vorhandene Volumen unter Umständen weit überschreitet, mit einer schnell laufenden Bandsäge ohne Mühe auf die gewünschte Größe zurechtschneiden;

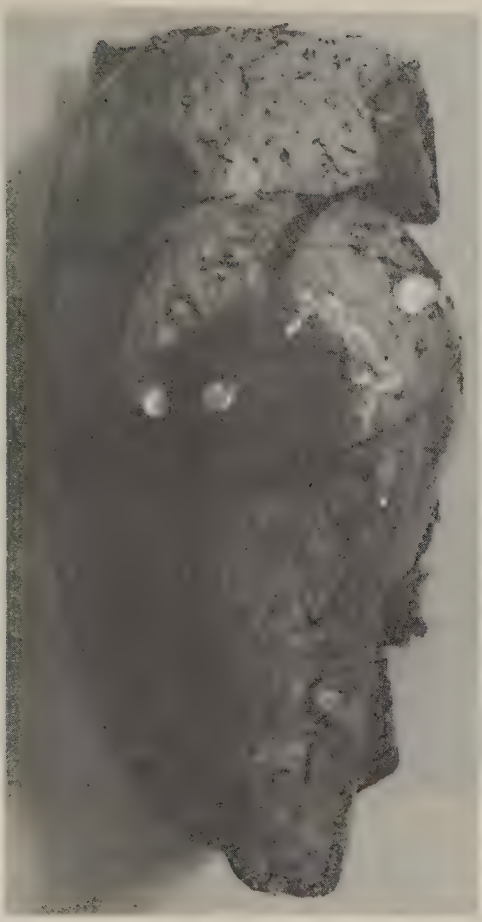


Abb. T 18: Darstellung des für die Versuchsaufnahmen verwendeten Lungenpräparates. Ansicht von ventro-lateral. Die Pleura ist zum Teil entfernt und es werden Anschnitte des Parenchym mit Quer- und Schrägschnitten von Gefäßen sichtbar (Bildmitte oben und unten)

Abb. T 19: Röntgenbild des Präparates beider Lungen. Die Arterien sind mit polymerisiertem Plastoid gefüllt. Die Lungen sind in ihrer räumlichen Anordnung erhalten.

kleinere Korrekturen lassen sich mit dem Skalpell vornehmen. Eine anschließende Behandlung mit Zapon-Lack hält das Präparat über längere Zeit unverändert (Abb. T 18).

7) Die Präparation kann bis zur isolierten Darstellung des Plastoidgefäßbaumes weitergeführt werden, indem das Präparat einer Zucht von Speckkäfern* vorgeworfen wird. Die Larven und die ausgewachsenen Käfer nehmen, wie sich gezeigt hat, das Präparat trotz des intensiven, acetonartigen Geruchs des Lösungsmittels an und mazerieren den Gefäßbaum vollständig.

8) Mit der angeführten Methode gelingt es, eine der Wirklichkeit entsprechende Füllung der Lungengefäße und damit ein typisches Röntgenbild zu erhalten (siehe Abb. T 19, Füllung des arteriellen Systems). Bei Weiterpräparation durch Mazeration des Gefäßbaumes können bestimmte Abschnitte im Gefäßbaum markiert und hinsichtlich ihrer Darstellbarkeit analysiert werden.

B.1 Herstellung von K u n s t s t o f f k u g e l n

Bei der Herstellung der Kunststoffkugeln konnte an Untersuchungen von CHANTRAINE (54, 55) und PULVERMACHER (200) angeschlossen werden, welche beide zur Anfertigung von Kugeln der Dichte 1 eine Mischung von Paraffin und Puderzucker verwendeten. Bei der von PULVERMACHER besonders erwähnten schwierigen Herstellung war unter Umständen eine Inhomogenität der Mischung geringeren Ausmaßes nicht zu vermeiden. Zudem konnte die Beibehaltung der Dichte 1 Schwierigkeiten machen. Inzwischen waren die thermoplastischen Kunststoffe entwickelt und ihre Behandlung zu hoher technischer Vollendung gebracht

* Dermestes lardarius L.

worden. Es konnte erwartet werden, damit homogene Kugeln konstanter Dichte 1, in aufsteigender Größenreihe zu erhalten. Der finanzielle Aufwand hierfür wäre jedoch sehr erheblich, wenn die Herstellung durch den kommerziellen Erzeuger vorgenommen werden sollte. Der Grund liegt in der geringen Stückzahl und in der aufsteigenden Größenreihe. Die Anfertigung einer entsprechenden Gußform und der saubere Ausstoß erst nach Verbrauch reichlichen Materials machen diese Herstellungsform für den Erzeuger erst rationell, wenn riesige Stückzahlen abgenommen werden. Selbst wenn die Gestehungskosten ohne Rentabilität erstattet würden, wären die Erzeuger noch nicht bereit, für solch kleine Stückzahlen ihren Maschinenpark bereitzustellen.

Damit ist es nicht möglich in der technischen Großfertigung eine aufsteigende Größenreihe nach ein- und derselben Technik herzustellen. So werden Kugeln bis zu 2 mm Durchmesser auf dem Wege der thermoplastischen Formung durch Perl-Polymerisation erreicht. Kugeln größeren Durchmessers müssen gegossen, bzw. im Vakuum gepresst werden. Es mußte deshalb nach einem Verfahren gesucht werden, mit welchem die Forderung der aufsteigenden Größenreihe von Kugeln der Dichte 1 aus thermoplastischen Kunststoffen erfüllt werden konnte. Schließlich wurde folgendes relativ einfache Verfahren entwickelt:

Ein thermoplastischer Kunststoff wurde in einem Eisentiegel mittels Erwärmung auf 140° C bis 150° C durch Heizbänder verflüssigt und die zähflüssige, honigartige Masse mit einem Eisenstab in Fäden aus dem Tiegel gezogen. Aus diesen Fäden liessen sich mittels einer Zange Kugeln der gewünschten Größe prägen. Die Prägezange weist am Ende ihrer Messingbranchen (Abb. T 20, unten) halb-

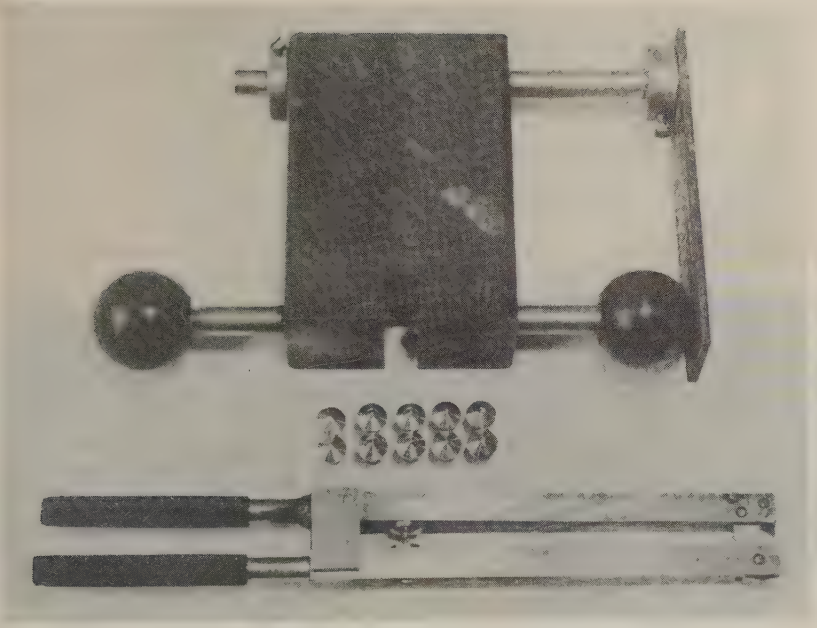


Abb. T 20: Abbildung der Prägevorrichtungen für die Kunststoffkugeln. Oben im Bild sind die in einem Eisenblock laufenden und am Ende mit Holzkugeln zur Handhabung versehenen Stahlstäbe zu erkennen. Die Prägung erfolgte in dem Einschnitt, in welchem die kegelartigen Messingaufsätze sichtbar sind. Von letzteren sind weitere Beispiele darunter aufgereiht. Unten quer angeordnet ist die Prägezange, in deren Mitte die Messingaufsätze sichtbar sind.

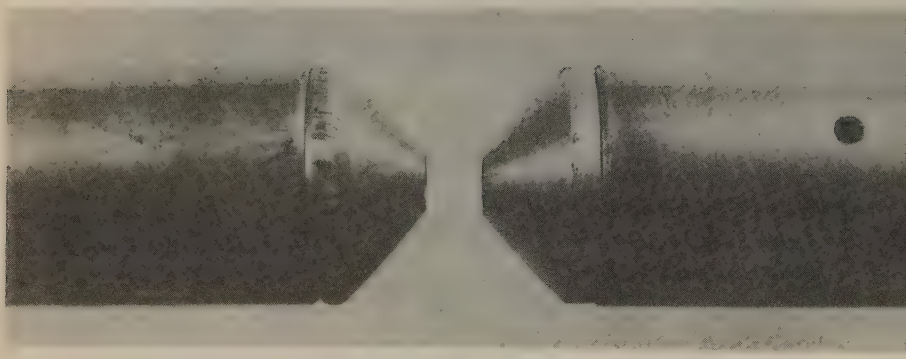


Abb. T 21: Vergrößerte Darstellung der kegelartigen Messingsaufsätze auf den Stahlstäben, mit den halbkugeligen Einsenkungen.

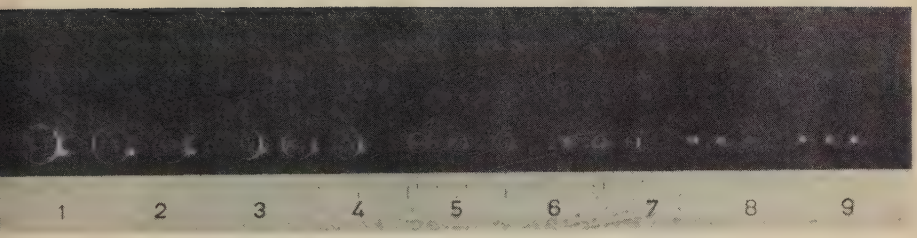


Abb. T 22 : Geprägte Kunststoffkugeln in von rechts nach links aufsteigender Größenreihe.
Material: Polystyrol, Dichte 1,05.
Die hellen Punkte in den Kugeln entsprechen Lichtreflexen, nicht etwa Lufteinschlüssen.
Teilstriche in mm.

Abb. T 23: Die in Abb. T 22 dargestellten Kunststoffkugeln, in ihrer Anordnung im, bzw. am Modell.
Maßstab: 1 : 1,75

Abb. T 24: Darstellung der aus Plexiglas gedrehten Kurgeln von 2-24 mm Ø und ihrer Anordnung am Modell. Maßstab: 1 : 1

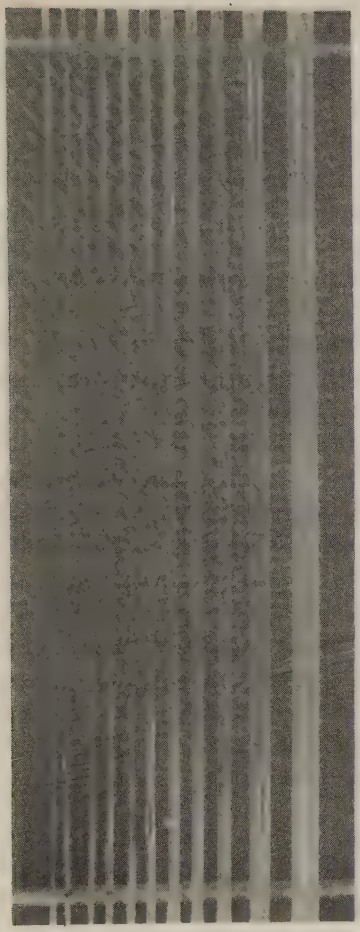


Abb. T 25: Darstellung des Perlon-Draht-Gitters in seiner Anordnung am Modell. Maßstab: 1 : 1

kugelige Hohlräume auf, welche durch Einsenken von Stahlkugeln entsprechender Größe erreicht worden waren. Für die Größen ab 1,5 mm im Durchmesser aufwärts wurde die Prägezange durch zwei Stahlstäbe ersetzt, welche an den Enden der Schmalseite mit Messingstücken versehen und welche halbkugelförmig eingesenkt worden waren. Wie beim Prägen mit der Zange wurden die Kugeln aus den langgezogenen Kunststoffäden nach Erwärmung geprägt.

Bei der Bearbeitung des Materials mußte die Temperatur so hoch sein, daß es einerseits dünnflüssig genug war, um auf die gewünschte Kugelgröße gepreßt zu werden, andererseits jedoch schon von einer gering festeren Haut umkleidet sein mußte, damit Lufteinschlüsse - wie sie physikalisch beim Prägen aus zwei Halbkugeln auftreten mußten - vermieden werden konnten. Mit diesem Verfahren gelang es, Kugeln der Dichte 1,05 (Polystyrol, BASF) in der Größenreihe 0,7 - 1,0 - 1,5 - 2,0 - 3,0 - 4,0 mm homogen und ohne Lufteinschlüsse zu prägen (Abb. T 22, T 23). In Fortsetzung der Größenreihe über 2,0 - 3,0 - 5,0 - 8,0 - 15,0 - 24,0 mm Durchmesser kamen aus Plexiglas gedrehte Kugeln mit der Dichte 1,18 zur Verwendung.

B. 2 Drahtgitter-Anordnungen

Perlon-Drähte mit der Dichte 1,14 wurden in einem Rahmen aus Plexiglas angeordnet:

Parallel, in einer Reihe abnehmender Größe, mit einem Abstand von Fadenrand zu Fadenrand von 2 mm, unabhängig von der Fadendicke. Die Fadendicken betrugen: 4,0 - 3,0 - 2,0 - 1,8 - 1,7 - 1,5 - 1,2 - 1,0 - 0,9 - 0,7 - 0,6 cm (Abb. T 25).

B.3. Anordnungen zur Untersuchung vor homogenem Untergrund und vor inhomogenem Hintergrund

Weitere Modellaufbauten dienten zur Klärung verschiedener Teilglieder der Entstehungs- und Wiedergabekette der Röntgenaufnahme, in Bezug auf den Einfluß von inhomogenem Untergrund und inhomogenem Hintergrund. Hierzu wurden aus lexiglasplatten die Wände des Thoraxmodells simuliert, wobei eine konstante Dicke vorlag und ein homogener Untergrund erreicht war. Der Abstand der Platten wurde gleich dem Tiefendurchmesser des Lungenhohlraums gehalten. Die Kugel- und Drahtanordnungen, wie eine Plexiglastreppe mit einer höchsten Höhe von 6mm (Abb. T 26), nach beiden Seiten in Stufen von 1 cm Tiefe und 1 mm Dicke abfallend, wurden in Kombination mit den Plexiglasplatten aufgenommen. Die Anordnung der Kugel- und Drahtphantome erfolgte auf dreifache Weise, einmal an der focusnahen Seite des Modells, einmal in der Mitte des Hohlraums, in Richtung des Strahlengangs gesehen, zum anderen an der focusfernen Seite des Modells.

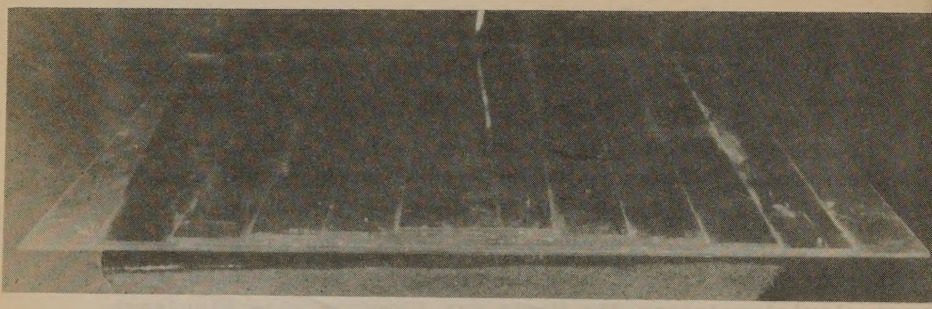


Abb. T 26: Plexiglastreppe:
Stufenhöhe 1 mm
Stufentiefe 10 mm